

Article, Published Version

**Franke, Dietrich**

## **Die Berechnung des Erddruckes in der Baupraxis**

Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau; Schriftenreihe Wasser- und Grundbau

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106180>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Franke, Dietrich (1980): Die Berechnung des Erddruckes in der Baupraxis. In: Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau; Schriftenreihe Wasser- und Grundbau 42. Berlin: Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau. S. 41-66.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



4) Dlc 624.134.532 Erddrucke

## Die Berechnung des Erddruckes in der Baupraxis

Dr.-Ing. Dietrich Franke, KdT

Technische Universität Dresden, Sektion Bauingenieurwesen

Seit etwa 200 Jahren bemühen sich Ingenieure den Druck, den angrenzendes Lockergestein auf Baukörper ausübt, rechnerisch zu erfassen.

Die erste Erddrucktheorie erschien 1776 in Paris und stammte von Coulomb. In der Zwischenzeit ist eine Vielzahl von Arbeiten veröffentlicht worden. Namen wie Poncelet, Culmann, Engesser, Rankine, Terzaghi, Krey, Ohde, Brinch Hansen, Sokolovsky, Caquot und Kerisel sind eng mit der Problematik verbunden. Die Weiterentwicklung der Kenntnisse über den Erddruck erfolgte durch theoretische Untersuchungen, die Verbesserung bestehender Theorien, die Schaffung neuer Theorien und durch experimentelle Forschungen. Die experimentellen Untersuchungen, soweit sie die Messung von Spannungen und Kräften einbezogen, konnten erst zu einem Zeitpunkt begonnen werden, als die technischen Voraussetzungen dazu vorhanden waren, das war an der Wende zum 20. Jahrhundert. Der hohe Aufwand, den derartige Versuche erfordern, ist sicher der Grund dafür, daß weitaus weniger Untersuchungen dieser Art vorliegen als rein theoretische.

Nachfolgend sollen die einzelnen Sonderfälle oder Arten des Erddruckes im Zusammenhang mit der Art und Größe der Wandbewegung dargestellt werden und aus den gegenwärtig vorliegenden Erkenntnissen Schlußfolgerungen für die praktische Erddruckberechnung gezogen werden, die auch ihren Niederschlag bei der Abfassung der Standards TGL 11464/03 und 04 fanden.

In Bild 1 ist die mögliche Vielfalt der Erddruckaufgaben gezeigt. Die Darstellung deutet auch die vom Ingenieur zu

treffenden Entscheidungen an, die vom Zeitpunkt der Absicht, Größe und Verteilung des Erddruckes für einen konkreten Fall zu bestimmen, bis zum Vorliegen einer sinnvollen Lastannahme, notwendig sind.

Schon die erste Frage, welche Art des Erddruckes zu erwarten ist (aktiver Erddruck, Erdruhedruck, passiver Erddruck oder ein dazwischen liegender Wert), ist oft schwerer zu beantworten als zunächst erscheint. Es sei in diesem Zusammenhang auf die oft vorhandene Unsicherheit bei der Wahl zwischen aktivem Erddruck und Erdruhedruck hingewiesen, wie z. B. bei der Berechnung von Baugrubenwänden. Andererseits wird in vielen Fällen bedenkenlos der voll mobilisierte passive Erddruck zum Ansatz gebraucht, ohne daß die dazu notwendigen Verformungen berücksichtigt werden.

Ist die Festlegung der Erddruckart erfolgt, ist der Einfluß der Lagerungsbedingung und der möglichen und zulässigen Art der Wandbewegung in Betracht zu ziehen. Beim aktiven Erddruck sind entsprechend Bild 1 vier Fälle und beim passiven Erddruck drei Fälle zu berücksichtigen, die für die Baupraxis von Bedeutung sind.

Für die Entscheidung bei der ersten Verzweigung der Problematik (Bild 1) ist es erforderlich, die "kritischen" Wandbewegungen zu kennen, die zur Auslösung des aktiven oder passiven Grenzzustandes notwendig sind. Diese "kritischen" Wandbewegungen sind von einer Reihe von Veränderlichen abhängig: von der Wandhöhe, der Wandneigung, der Art der Wandbewegung, den Eigenschaften des angrenzenden Lockergesteins usw.. Ihre Größe kann bis heute nur auf experimentellem Wege zuverlässig bestimmt werden. Die in der Vergangenheit durchgeführten Erddruckversuche, soweit sie nicht dem Ruhedruck galten, waren in der Regel darauf ausgerichtet, die Grenzwerte des Erddruckes und die ihnen entsprechenden kritischen Wandbewegungen zu bestimmen. Alle anderen Versuche besitzen nur eingeschränkte Bedeutung und gelten streng genommen nur

für die jeweilige Versuchswand. Das trifft z. B. auch für die Versuche von Müller - Breslau (1906) zu /1/. Obwohl er den Vergleich mit der Coulomb'schen Theorie als Ziel seiner Untersuchung angibt, vernachlässigt er bei seinen Versuchen die Coulomb'sche Forderung nach einem Extremwert. Die Beweglichkeit seiner Wand beruht nur auf der elastischen Verkürzung der Stützungsstäbe und reicht zur Erzeugung des aktiven Zustandes nicht aus.

Nachfolgend sollen, getrennt für die einzelnen Arten des Erddruckes, theoretisch und experimentell gefundene Ergebnisse gegenübergestellt werden. Bezüglich der angesprochenen Erddrucktheorien wird auf die Literatur verwiesen /2/.

#### Erdruhedruck

Die Ermittlung des Erdruhedruckes, als Druck auf eine unverschieblich gedachte Wand, ist ein noch unbefriedigend geklärtes Problem der Bodenmechanik. Stellt man die aus der Literatur bekannten Beziehungen für den Ruhedruckbeiwert grafisch dar, wie z. B. von Floß /3/ getan wurde, so ist die Unsicherheit erkennbar. Das gilt besonders in Fällen, die vom Rankine'schen Sonderfall abweichen. Die vereinfachte von Jaky /4/ angegebene Beziehung für den Ruhedruckbeiwert,  $K_{oh} = 1 - \sin \phi$ , liefert plausible Ergebnisse und wird vielfach angewendet. Sehr ähnliche Werte für den Ruhedruckbeiwert ergeben sich nach einer von Siedek (1962) vorgeschlagenen Beziehung  $K_{oh} = 0,25 + 0,75 K_{ah}$ . Sie hat außerdem den Vorteil, daß sie es gestattet, die Neigung der Wand und des Geländes durch den Beiwert für den aktiven Erddruck wenigstens in der Tendenz zu berücksichtigen.

Beide angegebenen Beziehungen für den Ruhedruckbeiwert liefern Werte in der Größenordnung, wie sie durch Erddruckmessungen von Terzaghi (1934) in einem Versuchskasten und von Muhs (1942) an einem 24 m hohen unterirdischen Stahlbetonbauwerk gemessen wurden /1, 3/.



Es muß noch darauf hingewiesen werden, daß der Erdruhedruck in hoch vorbelasteten Tonen größere Werte annehmen kann als die obigen Beziehungen liefern. Diese kommen aber auf dem Gebiet unserer Republik nicht vor.

Die Richtung des Erdruhedruckes sollte parallel zur Oberfläche und seine Verteilung dreieckförmig angesetzt werden. Ob der Erdruhedruck wie der aktive Erddruck durch Kohäsion herabgesetzt wird, besteht Unklarheit. Aus der Überlegung, daß der aktive Erddruck durch die Kohäsion vermindert und der passive Erddruck erhöht wird, wäre plausibel, daß der dazwischenliegende Ruhedruck durch die Kohäsion keine Änderung erfährt. Es ist deshalb üblich, die Kohäsion im Ruhezustand als unwirksam zu betrachten.

#### Aktiver Erddruck

Zur Überprüfung der Coulomb'schen Theorie und zur Gewinnung neuer Erkenntnisse führte Terzaghi (1934) /1/ Versuche an starren Wänden durch. Als Versuchsboden benutzte er einen trockenen Sand. Die Versuchswand war etwa 2 m hoch und 4 m lang. Diesen Versuch konnten durch spätere Untersuchungen an starren Wänden keine neuen Erkenntnisse hinzugefügt werden. Ergänzende Experimente wurden von Spilker (1937), Klenner (1941), Lehmann (1942) an Baugrubenwänden durchgeführt, bei denen die Steifenkräfte - wie sie unter normalen Verbaubedingungen entstehen - gemessen wurden. Die Messungen sind im Grunde keine Grenzwertuntersuchungen, auch wenn festgestellt wurde, daß die Gesamtdruckkraft etwa dem Coulomb'schen Grenzwert entspricht.

In Bild 2 sind die Versuchsergebnisse Terzaghis und theoretisch gefundene Angaben Ohdes /5, 6/ und Rendulics /7/ schematisch dargestellt.

Die mit Sand durchgeführten Versuche ergaben, daß sich bei hinreichend großen Verformungen sowohl bei der Wandbewegungsart A als auch bei Wandbewegungsart B eine dreieckige

e - Verteilung einstellt, daß die notwendigen Verformungen bei dichter Lagerung größer sind als bei lockerer Lagerung. Die Erddruckkraft  $E_a$  entspricht dem Coulomb'schen Wert.

Ohde (1938) hat auf theoretischem Wege eine Abweichung der e - Verteilung vom Dreieck für die Wandbewegungsarten C und D gefunden. Die für die Wandbewegungsart B angegebene Verteilung entspricht einer Überlagerung der Fälle A und C. Er gibt außerdem eine Abweichung der Größe der Erddruckkraft  $E_a$  vom Coulomb'schen Wert, der einem Flächenbruch nach Wandbewegungsart A entspricht, für die Fälle C und D an.

Die von Rendulic angegebenen e - Verteilungen wurden auf Grund plausibler Überlegungen gefunden.

Die Berechnungen Ohdes konnten den Einfluß der Lagerungsdichte nicht berücksichtigen. Die Überlegungen Rendulics haben ohnehin nur qualitativen Charakter.

Es ist deshalb begründet, die Versuchsergebnisse Terzaghis für die Wandbewegungsarten A und B als Grundlage für einen Wandbewegungsschlag zu nutzen. Eine Erweiterung der Angaben für die Wandbewegungsarten C und D kann in Auswertung zahlreicher neuerer Messungen an Baugrubenwänden in der angegebenen Form durchgeführt werden /8/.

Für die Fälle B, C und D ist charakteristisch, daß sich bei Erreichen einer bestimmten Verformung der aktive Erddruck mit einer vom Dreieck abweichenden Verteilung einstellt, die stark vereinfacht als Rechteck dargestellt werden kann. Bei zunehmender Verformung bleibt der Erddruck seiner Größe nach erhalten, bei nichtbindigem Lockergestein stellt sich aber nach und nach wieder eine Dreieckverteilung ein. Diese Erscheinung ist darauf zurückzuführen, daß sich zunächst nur ein Linienbruch ausbilden kann, der mit zunehmender Verformung bei nichtbindigem oder schwachbindigem Lockergestein in einen Flächenbruch übergeht.

Für die praktische Anwendung der dargestellten Erkenntnisse genügt die Angabe von Bewegungsgrößen aber nicht, zumal die Vorausberechnung von Bauwerksverformungen weder vom Aufwand noch von der Zuverlässigkeit her für diesen Zweck geeignet erscheint. Das gilt besonders auch im Hinblick auf die Genauigkeit der angegebenen Bewegungsgrößen.

Die im Standard TGL 11464/03 enthaltene Tabelle mit "Grenzverschiebungen" soll den Anwender auf den Zusammenhang Erddruckgrenzwerte - Grenzverschiebungen aufmerksam machen. Er wird daran gehindert, in den vom Standard nicht geregelten Ausnahmefällen, durch den Erddruckansatz Wandbewegungen zu provozieren, die dem entsprechenden Bauwerk oder Bauwerksteil nicht zugemutet werden können.

In allen wichtigen Fällen, bei denen die Wandbewegungsarten B, C oder D in Frage kommen, wie z. B. bei Baugrubenwänden, Spundwänden oder Schlitzwänden, werden konkrete Rechenvorschriften angegeben, die auf die besonderen Verformungseigenschaften, technologischen Bedingungen oder Baugrundbeschaffenheiten Rücksicht nehmen.

Die Versuche von Terzaghi und auch noch später durchgeführte Versuche für starre und biegsame Wände wurden fast ausschließlich mit senkrechter Wand und horizontaler Geländeoberfläche ausgeführt. Mit Ausnahme des Wandreibungswinkels  $\delta$  waren demnach die Bedingungen des Rankine'schen Sonderfalles erfüllt, für den die Coulomb'sche Theorie eine widerspruchsfreie Lösung liefert und auch mit moderneren Theorien, wie z. B. der Theorie von Sokolovski oder der Theorie von Caquot - Kerisel übereinstimmt. Da mit zunehmender Abweichung vom Rankine'schen Sonderfall die Erddruckgleitflächen immer weniger einer Ebene entsprechen, was besonders beim passiven Erddruck zu besprechen sein wird, muß die Anwendbarkeit der klassischen Theorie zum Teil eingeschränkt werden. Als zuverlässiges Maß wird eine Abweichung von etwa 10 % von der Theorie von Caquot-Kerisel angesehen. So darf

für eine Wandneigung  $\alpha$  von  $-20^\circ$  bis  $-10^\circ$  (das Minuszeichen bedeutet eine Unterschneidung der Wand) die Geländeneigung nur Winkel zwischen 0 und  $\Phi$  und für  $\alpha$  von  $-10^\circ$  bis  $\alpha_{\max}$  Winkel zwischen  $-\Phi$  und  $\Phi$  annehmen. Dabei entspricht der Winkel  $\alpha_{\max}$  dem Winkel zwischen der Gegengleitfläche und der Vertikalen /9/.

Die Theorie von Caquot-Kerisel /10/ wird im allgemeinen als zutreffend angesehen. Sie stellt eine plastizitätstheoretische Lösung dar, berücksichtigt keine Verformungen und setzt einen Flächenbruch voraus. Die Bedingungen des Gleichgewichtes werden im Gegensatz zur Coulomb'schen Theorie auch bei größeren Abweichungen vom Rankin'schen Sonderfall eingehalten. Die Theorie verwendet zwar keine Gleitfläche im Coulomb'schen Sinne, folgt man aber den Flächen, in denen die Bruchbedingung erfüllt ist, so findet man Flächen, die im Rankine'schen Bereich eben und außerhalb dieses Bereiches gekrümmt sind. Das stimmt auch mit den Beobachtungen bei Versuchen überein. Den Vorzügen dieser Theorie stehen aber auch einige Nachteile gegenüber, die sich für die praktische Anwendung als schwerwiegend herausstellen. Es wird eine ebene Wand und ebene Geländeoberfläche vorausgesetzt. Die Berücksichtigung von Auflasten ist nur möglich, wenn diese an der Wand beginnen und im gesamten Einflußbereich des Erddruckes in gleichbleibender Größe wirken. Die Berücksichtigung der Kohäsion über das "Theorem der korrespondierenden Zustände" nach Caquot ist umständlich und ungewohnt. Die Bestimmung von Erddruckbeiwerten ist schwierig und zeitraubend.

Die beschriebenen Umstände lassen es geraten erscheinen, die Anwendung der klassischen Theorie unter Berücksichtigung der genannten Einschränkungen auch weiterhin zu empfehlen. Dies gilt nicht zuletzt auch im Hinblick auf die Anwendungsmöglichkeit grafischer Methoden in geometrisch komplizierten Fällen, bei begrenzten Auflasten, der Einwirkung von Sickerströmungen und in ähnlichen Situationen.

## Passiver Erddruck

Erddruckversuche zur Untersuchung des passiven Zustandes sind hinsichtlich der aufzubringenden Kräfte und auch im Bezug auf die notwendige Ausdehnung des Versuchskastens senkrecht zur Versuchswand viel aufwendiger als die bereits beschriebenen Versuche.

Die ersten Versuche mit einer parallel verschiebbaren Wand (2 m x 2 m) wurden von Franzius (1924, 1928) /11/ durchgeführt. Sie verfolgten den Zweck, die Größe des passiven Erddruckes und den notwendigen Wandverschiebungsweg zu messen, die Form der Bruchfläche zu ermitteln und die Übereinstimmung mit analytischen Verfahren (Coulomb, Streck) zu prüfen.

Terzaghi (1934) führte im Zuge der Versuche zur Untersuchung des aktiven Zustandes auch einen Versuch zur Untersuchung des passiven Zustandes durch. Die weiter vorn bereits beschriebene Wand wurde um eine Achse dicht unter ihre Unterkante gedreht.

Wichtige Versuche stammen weiterhin von Tschebotarioff/Johnsen (1953), Rowe/Peaker (1965), /13/ Narain/Saran/Nandakumaran (1969) /14/, Horn (1971) /15/.

Die Auswertung aller Versuche zeigt, daß die Coulomb'sche Theorie nur im Rankine'schen Sonderfall verlässliche Ergebnisse liefert.

Bei Abweichungen hiervon sind die Gleitflächen keine Ebenen mehr. Dadurch ergeben sich kleinere Kräfte für den passiven Erddruck als bei der Annahme ebener Gleitflächen. Die bei den Versuchen ermittelten Erddruckgrößen stimmen recht gut mit den Ergebnissen überein, die nach den Methoden von Streck /16/, Ohde oder nach der Theorie von Caquot-Kerisel erhalten werden. Bezüglich der kritischen Wandbewegungen sind die Angaben nicht so einheitlich. Das hat folgende Ursachen. Da die Kraft-Weg-Kurve vor Erreichen ihres Größtwertes ganz allmählich in die horizontale Tangente übergeht,



ist es sehr schwierig, den kritischen Weg anzugeben. Außerdem ist deren Größe stark von der Lagerungsdichte und von der Art der Wandbewegung abhängig. Soviel steht aber fest, die notwendigen Verschiebungswege zur Mobilisierung des passiven Erddruckes sind größer als allgemein angenommen wird. Der Zusammenhang Erddruckgröße und Verschiebungsweg hat deshalb beim passiven Erddruck eine erheblich größere baupraktische Bedeutung als beim aktiven Erddruck. In diesem Zusammenhang spielt auch die Festlegung einer Sicherheit gegen Erreichen des passiven Bruchzustandes, z. B. für Spundwände, eine wichtige Rolle. Nimmt man an, daß etwa bei  $\frac{1}{10}$  der kritischen Wandverschiebung (Parallelbewegung) bereits die Hälfte des passiven Erddruckes mobilisiert ist, so bedeutet das, daß die Festlegung eines Sicherheitswertes gegen Bruch von 2, gleichzeitig eine Verformungsbeschränkung auf etwa  $\frac{1}{10}$  des kritischen Wertes darstellt.

Bild 3 zeigt die Abhängigkeit der Größe des passiven Erddruckes und der kritischen Wandbewegung von der Lagerungsdichte für parallele Wandbewegung. Bild 4 veranschaulicht außerdem den Einfluß der Art der Wandbewegung. Verwunderlich ist allerdings in dieser Darstellung, daß bei der Wandbewegungsart C der Erddruck bei dichter Lagerung kleiner ist als bei lockerer Lagerung. Sehr deutlich ist der große Einfluß der Lagerungsdichte auf die kritische Wandbewegung.

Die Angaben verschiedener Autoren über die zu erwartenden kritischen Verschiebungen im passiven Zustand sind in Bild 5 angegeben. Die große Streuung der Vorschläge deutet auf die Unsicherheit der Angaben hin. Die durchgezogenen Linien sind die grafische Darstellung der im Standard TGL 11464/03 angegebenen Beziehungen. Hinsichtlich ihrer Bedeutung für die praktische Anwendung gilt das schon beim aktiven Erddruck ausgeführte.

Weiterhin wurde festgestellt, daß die Art der Wandbewegung auch die Verteilung des passiven Erddruckes beeinflusst.



In Bild 6 sind neben den analytisch gefundenen Erddruckflächen auch die Ergebnisse einiger Erddruckversuche enthalten. Bei ihrer Einschätzung ist zu beachten, daß Erddruckmessungen ohnehin sehr schwierig sind und Abweichungen von  $\pm 10\%$  durchaus als normal angesehen werden können.

Es läßt sich feststellen, daß im Fall A kaum mit einer dreieckförmigen Verteilung des passiven Erddruckes zu rechnen ist, bestenfalls bei einer sehr dichten Lagerung. Die gemessenen Verteilungen stehen im Widerspruch zur klassischen Annahme. Beim Fall C entspricht die Verteilung des Erddruckes etwa der Ohde'schen Hypothese. Durch die Versuche von Rowe/Peaker und auch aus einer Überlagerung der Angaben für die Fälle A und C kann angenommen werden, daß im Falle einer parallel verschobenen Wand im Grenzzustand eine dreieckförmige Verteilung des passiven Erddruckes zu erwarten ist.

Wird der passive Erddruck zur Stützung eines Bauwerkes herangezogen, wie z. B. bei Spundwänden, so ist es notwendig, eine bestimmte Sicherheit gegenüber dem Bruchzustand im Boden einzuhalten. Eine nur teilweise Mobilisierung des passiven Erddruckes erfordert nur eine kleinere Bewegung der Wand als die kritische, die wiederum eine andere Verteilung des Erddruckes als ein Bruchzustand zur Folge hat.

Die Abhängigkeit zwischen dem Mobilisierungsgrad des passiven Erddruckes  $E/E_p$  von der relativen Verschiebung  $\Delta a/\Delta a_{Ep}$  wie die etwa bei einer Wandbewegung nach Fall B gilt, zeigt Bild 7. Sie ist in Form der Tabelle 1 in den genannten Standard eingegangen. Ihre Gültigkeit ist im konkreten Fall sicher anfechtbar, wenn zu hohe Genauigkeitsforderungen gestellt werden. Sie gestattet aber in erster Näherung diesen wichtigen Zusammenhang zu berücksichtigen.

Versuchsergebnisse für unterschiedliche Ausnutzungsgrade des passiven Erddruckes enthält Bild 8 für sehr steife Wände und eine Veranschaulichung der Zusammenhänge von Weißenbach bzw. einen Berechnungsvorschlag von Ohde zeigt Bild 9.

In den meisten praktisch vorkommenden Fällen wird der Wandbewegungsfall B - in weniger häufigen Fällen der Bewegungsfall A - auftreten. Es ist deshalb sinnvoll bei wenig biegsamen Wänden eine mit der Tiefe lineare Zunahme des passiven Erddruckes anzunehmen. Für den Bewegungsfall A bedeutet das nur eine geringe zusätzliche Sicherheit. Das gleiche gilt auch für biegsame Wände, zumal die Festlegung einer Grenze zwischen biegsam und wenig biegsam schwierig sein dürfte.

Es bleiben die Bohlträger. Von Weißenbach /8/ wird für den Gebrauchszustand bei einer Sicherheit von 2 eingeschätzt, daß der Angriff von  $E_p$  etwa bei  $0,4 \cdot t$  anzunehmen ist, wenn  $t$  die Einbruchtiefe darstellt. Nach dem Ohde'schen Vorschlag erhält man für die gleiche Sicherheit den Angriffspunkt des passiven Erddruckes bei  $0,43 \cdot t$ . Bei einer Einbindetiefe des Trägers von 3 m heißt das, daß gegenüber einer hydrostatischen Verteilung des Erddruckes sich der Angriffspunkt der Erddruckkraft von 1 m über dem Rammträgerfuß auf 1,20 bzw. nach Ohde auf etwa 1,30 m, also um 20 oder 30 cm verschiebt.

Aus diesem Grunde und da Bohlträger ohnehin wieder gezogen werden, sollte zur Vereinfachung und Vereinheitlichung der Berechnung der passive Erddruck im allgemeinen dreieckförmig angesetzt werden.

#### Erddruck als Lastannahme

Bisher wurden die Sonderfälle des Erddruckes, Erdruchdruck, aktiver Erddruck, passiver Erddruck besprochen. Diese Sonderfälle sind lediglich durch physikalische Besonderheiten festgelegt. Es ist deshalb naheliegend, daß diese speziellen Verformungsbedingungen nicht von vornherein auch mit denen unserer Bauwerke identisch zu sein brauchen. Allgemein ist es in der Technik üblich, bei Unsicherheit hinsichtlich der Lastannahmen, eine auf der sicheren Seite liegende zu wählen. Zur Verdeutlichung des Sachverhaltes

beim Erddruck wollen wir uns nun die Erddruckbeiwerte betrachten, die den genannten drei Sonderfällen bei einem nichtbindigen Lockergestein mit einem Winkel der inneren Reibung von  $30^\circ$  im Rankine'schen Sonderfall entsprechen.

$$K_a = 0,333 \quad K_o = 0,5 \quad K_p = 3$$

Man sieht, daß der Erdruhedruck etwa das anderthalbfache und der passive Erddruck nahezu das zehnfache des aktiven Erddruckes beträgt. Die Verhältnisse können beim Vorhandensein von Wandreibung oder einer Kohäsion noch gravierender sein. Bei den weiteren Überlegungen wollen wir unterscheiden, ob der Erddruck für den zu untersuchenden Fall belastend oder stützend wirkt.

Belastend wirkender Erddruck kann sich in der Regel nur in den Grenzen des aktiven Erddruckes und des Ruhedruckes bewegen. Ausnahmen hiervon sind der Erddruck infolge künstlicher Verdichtung, der Erddruck in der Stauchungszone von Bergsenkungsgebieten und der Erddruck auf Baukörper, die infolge Wärmeausdehnung gegen das Lockergestein gepreßt werden.

Stützender Erddruck tritt bei allen in den Untergrund einbindenden Wänden, wie z. B. Spundwänden, Schlitz- und Bohlwänden oder horizontal belasteten Pfählen oder Fundamenten auf. Er liegt im Normalfall in den Grenzen des Erdruhedruckes und des passiven Erddruckes.

Es gelten folgende Grundsätze:

a) belastend wirkender Erddruck

Aktiver Erddruck kann sich nur ausbilden, wenn die belastete Wand unter der Belastung eine hinreichend große Bewegung ausführen kann und darf. Diese Bewegungsmöglichkeit muß während der gesamten Standzeit der Wand erhalten bleiben oder muß wenigstens dem Bruchvorgang ohne nachteilige Wirkung für die Wand und die angrenzenden Bauteile vorausgehen können.

Erdruhedruck ist anzusetzen, wenn die belastete Wand praktisch als starr und unbeweglich anzusehen ist oder wenn eine konstruktiv bzw. funktionell bedingte Verformungsbegrenzung vorhanden ist, die im Laufe der Zeit ein Anwachsen des Erddruckes auf den Ruhedruck bedingt. Ein typisches Beispiel hierfür sind Kellerwände.

Bei Stützwänden, wie z. B. Baugrubenwänden mit hoch vorgespannten Ankern oder Steifen, oder bei sehr tief eingebundenen Schlitz- oder Bohrpfehlwänden wird ein Erddruck wirken, der zwischen dem aktiven und dem Erdruhedruck liegt. Dieser Erddruck wird als "erhöhter aktiver Erddruck" bezeichnet. Er kann nur auf Grund von Erfahrungen zwischen den genannten Grenzen festgelegt werden und sollte möglichst durch Messungen kontrolliert werden.

#### b) stützend wirkender Erddruck

In diesem Fall kann ein zu groß angesetzter Erddruck zu starken Verformungen oder zum Versagen der Stützkonstruktion führen. Es ist deshalb eine bestimmte Sicherheit gegen Bruch einzuführen und es gelten die Ausführungen über den Gebrauchszustand, die bei der Behandlung des passiven Erddruckes gemacht wurden. Besonderes Augenmerk ist auf die Verformungsabhängigkeit des stützenden Erddruckes zu legen. Es muß stets geprüft werden, ob die dem Erddruckansatz entsprechend zu erwartenden Verformungen mit den Verformungsmöglichkeiten und den damit zusammenhängenden Beanspruchungen des Bauwerkes verträglich sind.

Abschließend muß bemerkt werden, daß fast alle vorliegenden Versuchsergebnisse, die zur Untermauerung theoretischer Erkenntnisse herangezogen wurden, mit Sanden oder Kiesen gewonnen wurden. Es bleibt uns nichts anderes übrig, als diese Erfahrungen vorsichtig auch auf bindige Lockergesteine zu übertragen. Entsprechende Einschränkungen bezüglich der Konsistenz sind in den einschlägigen Vorschriften enthalten. Die Wirkung der Kohäsion sollte nur in einer Größe in

Ansatz gebracht werden, wie sie unter den gegebenen Umständen während der gesamten Standzeit des jeweiligen Bauwerkes mit Sicherheit erwartet werden kann.

#### Literatur

- /1/ Neumeuer, H.  
Erddruck und Erdwiderstand, Hamburg 1960
- /2/ Kézdi, A.  
Erddrucktheorien  
Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag 1962
- /3/ Floß  
Hinterfüllung und Entwässerung von Brückenwiderlagern  
und Stützmauern  
Straße und Autobahn (1969) 12
- /4/ Jaky, J.  
The coefficient of earth pressure at rest  
Journ. Soc. Hungarian Architects a. Engineers  
Budapest 1944
- /5/ Ohde, J.  
Zur Theorie des Erddruckes unter besonderer Berücksichtigung der Erddruckverteilung  
Die Bautechnik 16 (1938) 10/11, 13, 19, 25, 37, 42, 53/54
- /6/ Ohde, J.  
Zur Erddrucklehre  
Die Bautechnik 25 (1948)6; 26 (1949)12; 27 (1950)4; 28 (1951)12; 29 (1952)2, 8; 11
- /7/ Rendulic, L.  
Der Erddruck im Straßenbau und Brückenbau  
Berlin 1938
- /8/ Weißenbach, A.  
Baugruben  
Berlin, München, Düsseldorf, Ernst-Verlag 1975



- /9/ Ohde, J.  
Hütte III, Grundbaumechanik, 28. Auflage  
Berlin, Verlag-Ernst 1956
- /10/ Caquot, A.; Kerisel, J.  
Grundlagen der Bodenmechanik  
Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag 1967
- /11/ Franzius, O.  
Erddruckversuche im natürlichen Maßstabe  
Der Bauingenieur 9 (1928) 43
- /12/ Zweck, H.  
Erdwiderstand als räumliches Problem  
Bautechnik (1953) 7
- /13/ Rowe, P. W.; Peaker, K.  
Passive Earth Pressure Measurements  
Geotechnique 15 (1965) 1
- /14/ Narein, J.; Saran, S.; Nandakumaran, D.  
Model Study of Passive Pressure in Sand  
Proc. ASCE, Journal of the Soil Mech. Found. Div.  
95 (1969) SM 4
- /15/ Horn, A.  
Sohlstreibung und räumlicher Erdwiderstand bei massiven  
Gründungen in nichtbindigem Boden  
Mitt. d. Inst. f. Verkehrswasserbau, Grundbau und Bodenmechanik der TH Aachen  
H. 110 der Schriftenreihe "Straßenbau und Verkehrstechnik"
- /16/ Streck, A.  
Beitrag zur Frage des passiven Erddruckes  
Der Bauingenieur 7 (1926) 1, 2



Erddruckkraft E bei einer Wandbewegung  
 $\Delta a < \Delta a_{Ep}$

$\frac{\Delta a}{\Delta a_{Ep}}$	Erddruckkraft E
$< 0,1$	$E_0$ nach Abschnitt 4.3.
$\geq 0,1$ $< 0,3$	$E_p (0,32 + 1,8 \cdot \frac{\Delta a}{\Delta a_{Ep}})$
$\geq 0,3$ $< 1$	$E_p (0,8 + 0,2 \cdot \frac{\Delta a}{\Delta a_{Ep}})$

Tabelle 1 Erddruckkraft E bei einer Wandbewegung  
 $\Delta a < \Delta a_{Ep}$

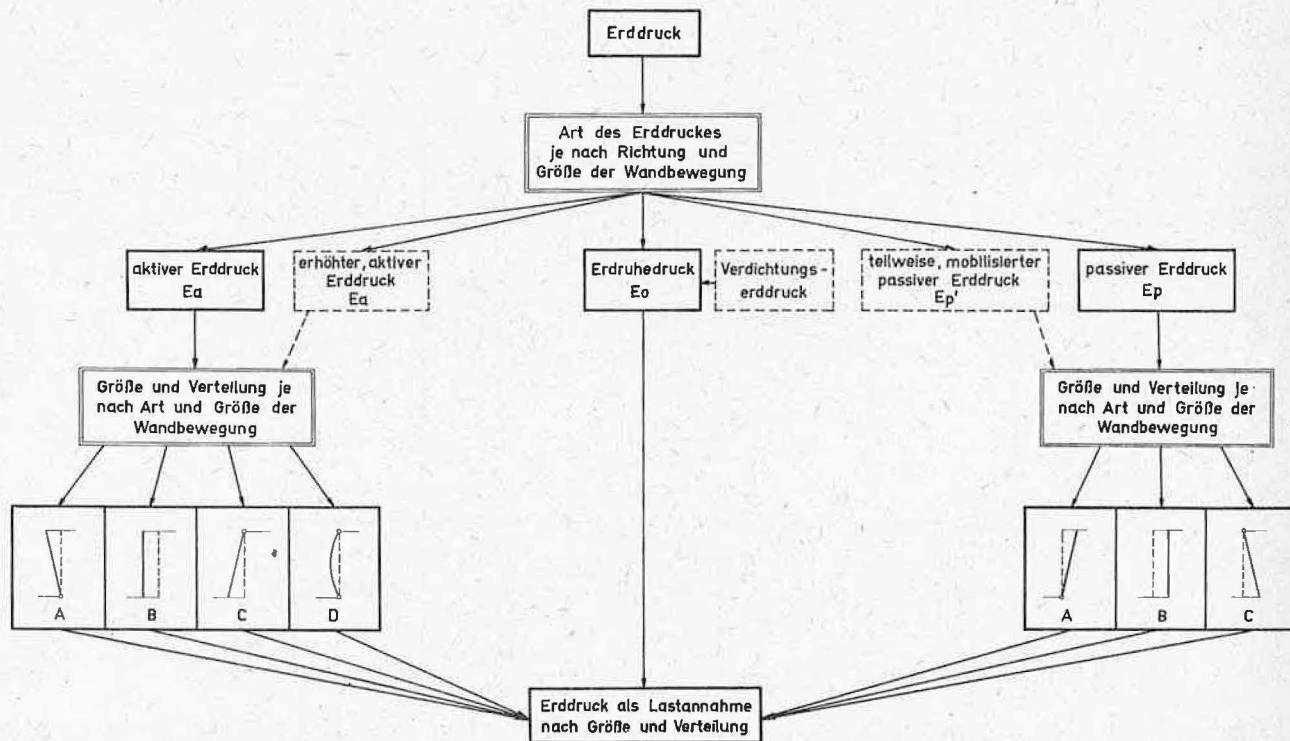




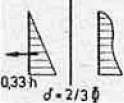
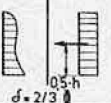
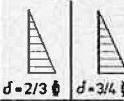
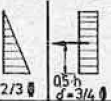
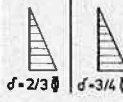
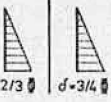
















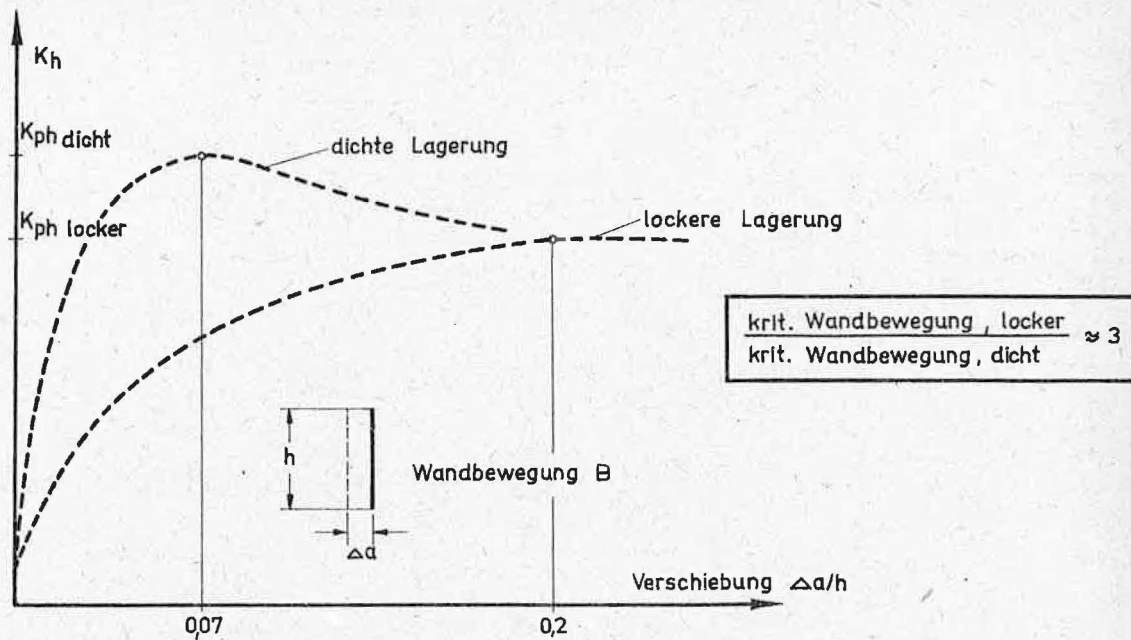
Bild 1 Arten des Erddruckes - Sonderfälle der Wandbewegung

## Größe und Verteilung des aktiven Erddruckes

Wandbewegung				
TERZAGHI 1934	Lagerung locker.   dicht	Lagerung locker   dicht		
	$\Delta a = 0,001h$ 	$\Delta a = 0,0005h$ 		
$E_a \approx E_{af}$ nach COULOMB	$\Delta a = 0,005h$ 	$\Delta a = 0,0025h$ 		
	$\Delta a = 0,01h$ 	$\Delta a = 0,005h$ 		

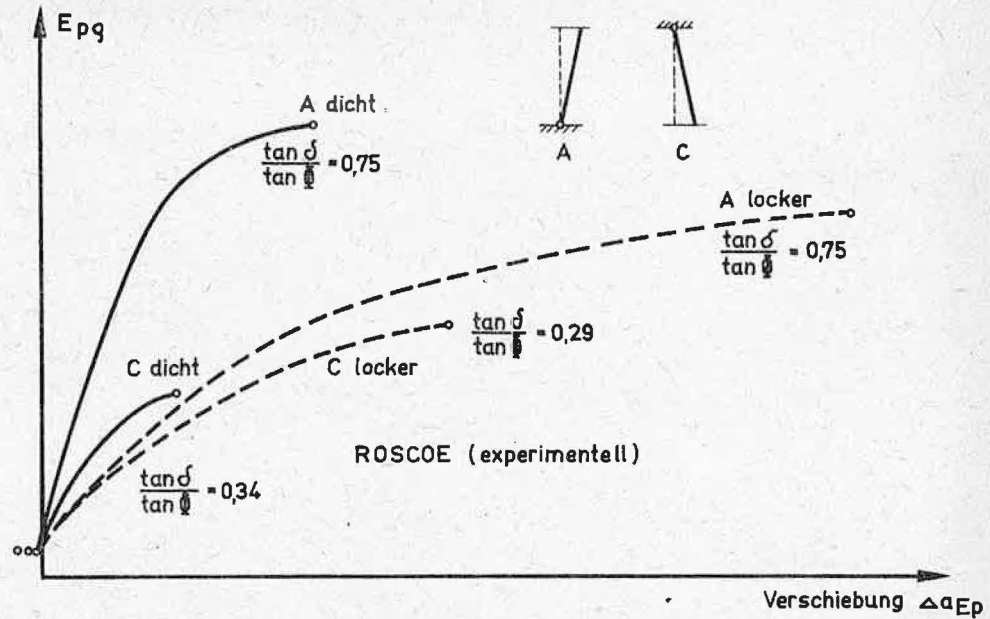
OHDE (theoretisch) 1938 für $\tan \vartheta = 0,6$		aus A/C 		
	0,33 · h	( $\approx 0,43 \cdot h$ )	0,50 · h ... 0,55 · h	0,40 · h ... 0,45 · h
	$\delta = 0$	$E_{aF}$	(1,06 · $E_{aF}$ )	1,12 · $E_{aF}$
	$\tan \delta = 0,3$	$E_{aF}$	(1,08 · $E_{aF}$ )	1,17 · $E_{aF}$
RENDULIC 1938				
TGL 11464/03  $E_a = E_{aF}$ nach COULOMB (mit bestimmten Einschränkungen)	$\Delta a \geq 0,002h$ 	$0,001h \leq \Delta a < 0,005h$  $\Delta a \geq 0,005h$ 	$0,002h \leq \Delta a < 0,01h$  $\Delta a \geq 0,01h$ 	$0,002h \leq \Delta a = 0,01h$  $\Delta a \geq 0,01h$ 
	$E_{aF}$	$E_{aF}$	$E_{aF}$	$E_{aF}$

$E_{aF} \neq E_a$  infolge Flächenbruch (Wandbewegung A)



Notwendige Wandbewegungen zur Erreichung der Grenzzustände für lockere und dichte Lagerung

Bild 3 Abhängigkeit der Größe des passiven Erddruckes und der kritischen Wandbewegung von der Lagerungsdichte



Abhängigkeit der Größe von  $E_p$  und von  $\Delta a_{Ep}$  von der Lagerungsdichte und von der Art der Wandbewegung

Bild 4 Abhängigkeit der Größe des passiven Erddruckes und der kritischen Wandbewegung von der Lagerungsdichte und der Art der Wandbewegung



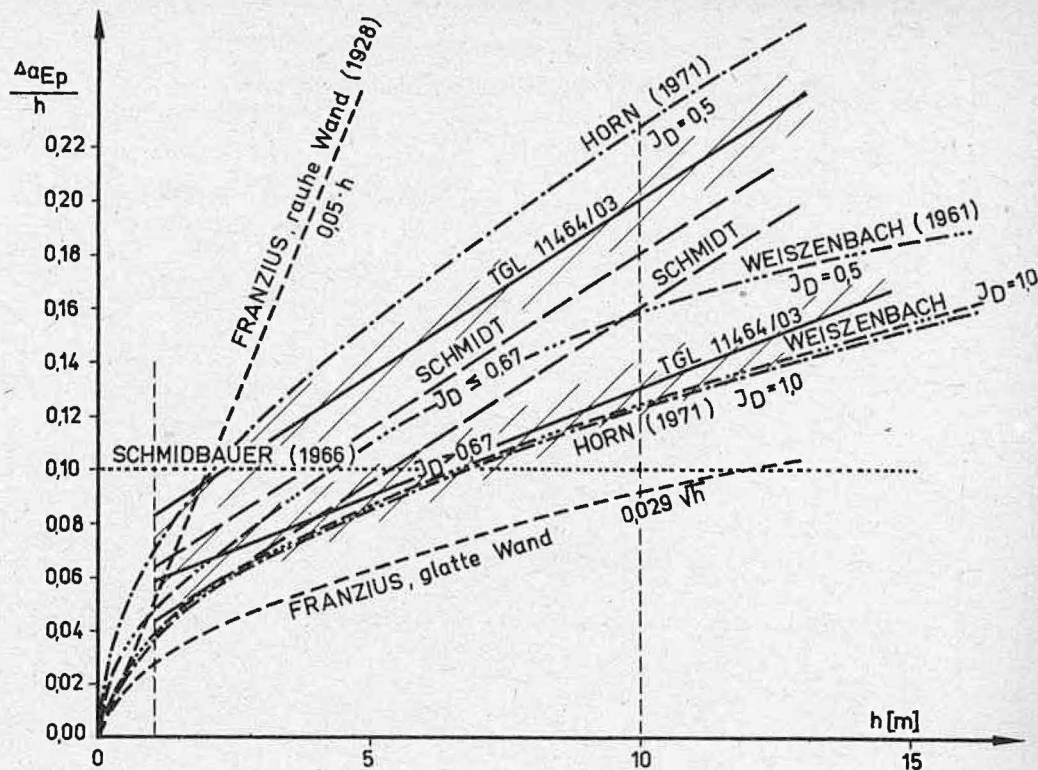
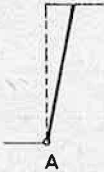
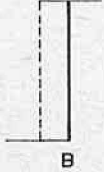

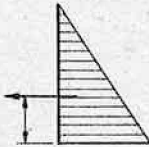
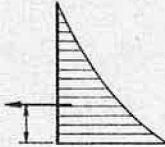
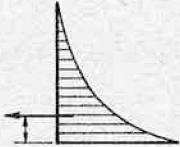
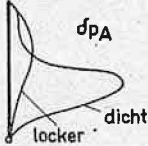
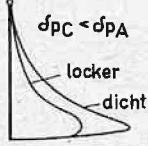
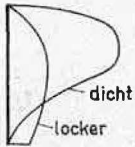
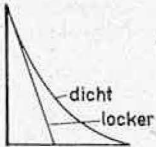
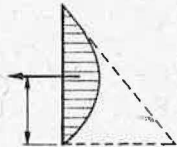
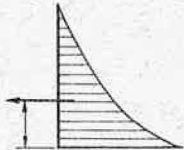
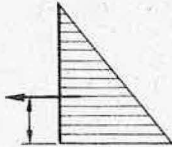


Bild 5 Kritische Wandbewegung beim passiven Erddruck.  
Angaben verschiedener Forscher

# Verteilung des passiven Erddruckes

Wandbewegung	 A	 B	 C
OHDE (theoretisch) 1938	 $z = h/3$ $E_{pF}$	 $z_B < h/3$ $E_{pB} < E_{pF}$	 $z_C < z_B$ $E_{pC} < E_{pB}$
ROSCOE (experimentell) 1970	 $\delta p_A$ locker · dicht dichte Lagerung: $E_p \approx E_{pF}$ lockere Lagerung: $E_p \approx 0,7 \cdot E_{pF}$ (bei Berücksichtigung der gemessenen Wand - reibungswinkel)		 $\delta p_C < \delta p_A$ locker dicht dichte Lagerung: $E_p \approx E_{pF}$ lockere Lagerung: $E_p \approx E_{pF}$ (bei Berücksichtigung der gemessenen Wand - reibungswinkel)

<p>ROWE (experimentell) 1951 1965</p>			
<p>WEISZENBACH (experimentell) 1975</p> <p>Ohne Behinderung der Vertikalbewegung !</p>	 <p><math>z = h/2</math> <math>E_p \approx 0,50 \cdot E_{pF}</math></p>		 <p><math>z = h/3</math> <math>E_p \approx E_{pF}</math></p>
<p>ROWE / PEAKER (experimentell) 1965</p>		 <p><math>z = h/3</math></p>	

$E_{pF} = E_{pF} \text{Flächenbruch}$

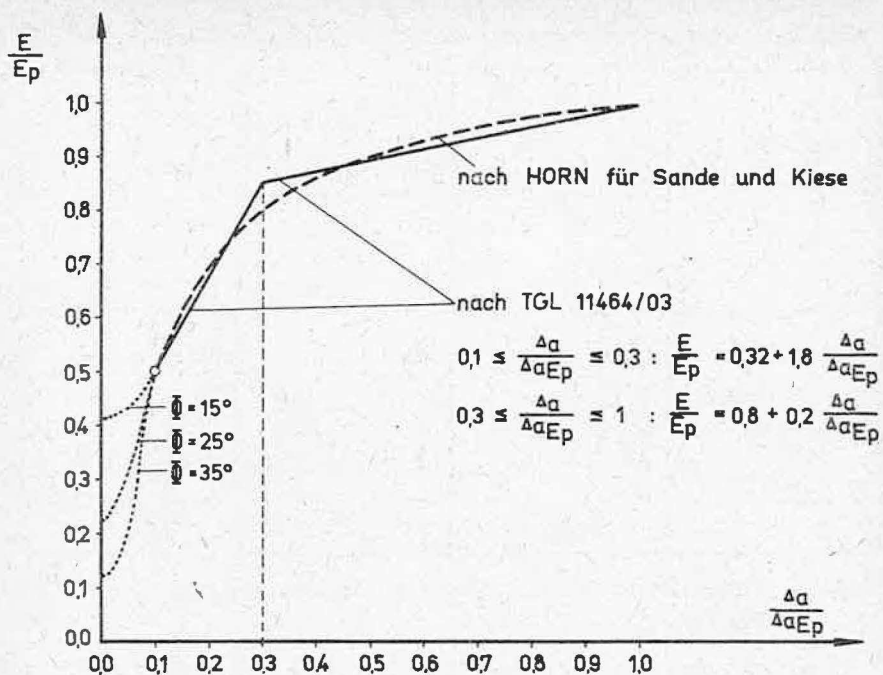
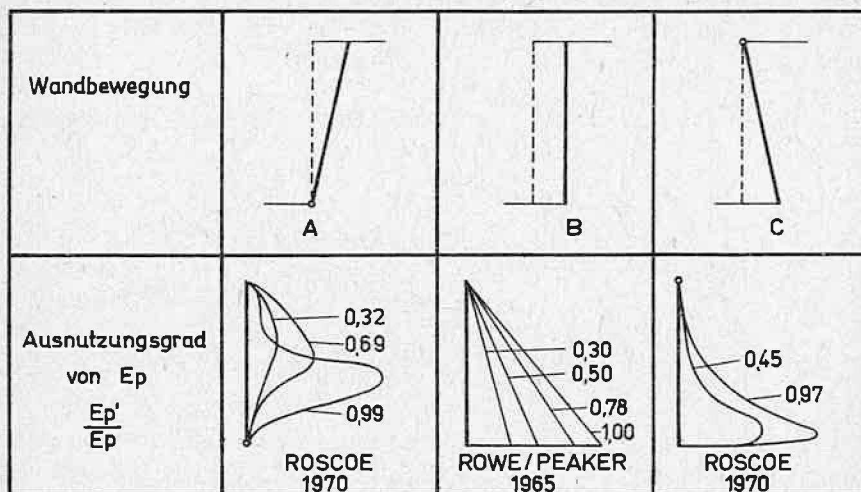


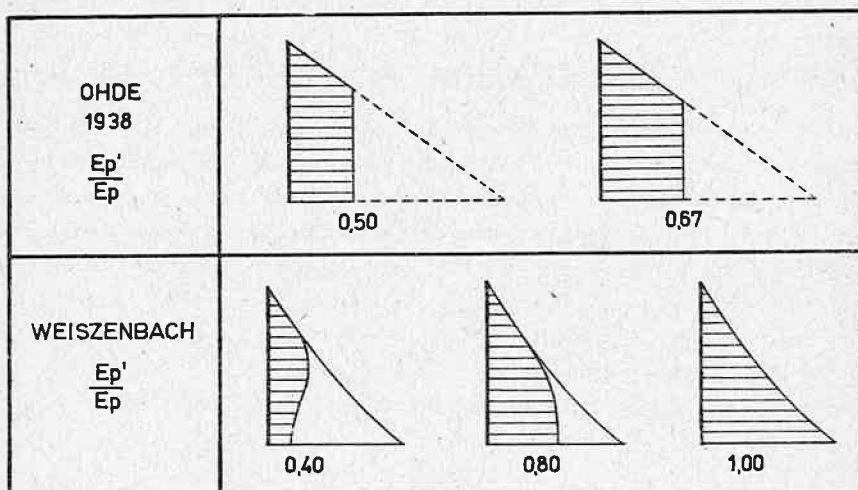
Bild 7 Grad der Mobilisierung des passiven Erddruckes

**Verteilung von  $E_p$  im Gebrauchszustand bei starren Wänden (Bohrpfahlwände, schwere Spundwände).**



**Bild 8 Passiver Erddruck im Gebrauchszustand bei starren Wänden**

**Verteilung von  $E_p$  im Gebrauchszustand bei elastischen Wänden (leichtere Spundwände, Bohlträger) für Wandbewegung B.**



**Bild 9 Passiver Erddruck im Gebrauchszustand bei elastischen Wänden**